

Efeitos da aplicação de lodo celulósico e de cinza de caldeira
em área de produção de *Pinus taeda*



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Florestas
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

DOCUMENTOS 324

Efeitos da aplicação de lodo celulósico e de cinza de caldeira em área de produção de *Pinus taeda*

*Shizuo Maeda
João Bosco Vasconcellos Gomes
Itamar Antonio Bognola*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Florestas

Estrada da Ribeira, km 111, Guaraituba,
Caixa Postal 319
83411-000, Colombo, PR, Brasil
Fone: (41) 3675-5600
www.embrapa.br/florestas
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações da
Embrapa Florestas

Presidente
Patrícia Póvoa de Mattos

Vice-Presidente
José Elidney Pinto Júnior

Secretário-Executivo
Neide Makiko Furukawa

Membros
*Álvaro Figueredo dos Santos, Gizelda Maia Rego,
Guilherme Schnell e Schühli, Ivar Wendling, Luis
Cláudio Maranhão Froufe, Maria Izabel Radomski,
Marilice Cordeiro Garrastazu, Valderês Aparecida
de Sousa*

Supervisão editorial
José Elidney Pinto Júnior

Revisão de texto
José Elidney Pinto Júnior

Normalização bibliográfica
Francisca Rasche

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Neide Makiko Furukawa

Fotos capa
Shizuo Maeda

1ª edição
Versão digital (2018)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Florestas

Efeitos da aplicação de lodo celulósico e de cinza de caldeira em área
de produção de *Pinus taeda*. / Shizuo Maeda... [et al.]. - Dados
eletrônicos. - Colombo : Embrapa Florestas, 2018.
(Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958; 324)

Disponível em:
<<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/item/221>>

1. Solo florestal. 2. Fertilidade. 3. Resíduo industrial. 4. Biomassa
florestal. 5. Química do solo. I. Maeda, Shizuo. II. Gomes, João Bosco
Vasconcellos. III. Bognola, Itamar Antonio. IV. Série.

CDD (21. ed.) 631.8

Autor

Shizuo Maeda

Engenheiro-agrônomo, doutor em Produção Vegetal, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR

João Bosco Vasconcellos Gomes

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Itamar Antônio Bognola

Engenheiro-agrônomo, doutor em Engenharia Florestal, pesquisador da Embrapa Florestas, Colombo, PR

Apresentação

A destinação de resíduos é um tema relevante do momento, tanto no aspecto ambiental quanto no econômico. Os problemas decorrentes da disposição inadequada dos mesmos, com consequente contaminação dos recursos hídricos e do solo resultando em prejuízos para a biodiversidade, têm demandado a ação das instituições de pesquisa no sentido de viabilizar o seu aproveitamento como insumo, solucionando o problema ambiental de destinação e dando um destino nobre para os mesmos.

A aplicação de resíduos do processamento da madeira para obtenção de celulose e papel em plantios florestais é uma forma de disposição que pode atender os diplomas legais, ao mesmo tempo em que possibilita o retorno de nutrientes retirados com a colheita da biomassa florestal, contribuindo para a sustentabilidade do sítio florestal.

Relata-se nessa publicação, os resultados de pesquisas realizadas pela Embrapa Florestas em parceria com a Iguaçu Celulose e Papel, com o objetivo de aproveitar resíduos como insumo para o plantio de *Pinus taeda*.

Com esta publicação, a Embrapa Florestas visa o alcance de sua missão, contribuindo para viabilizar soluções tecnológicas, por meio da geração, adaptação e transferência de conhecimentos científicos e tecnológicos em benefício da sociedade.

Sérgio Gaiad

Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

Sumário

1	Introdução	9
2	Objetivo	10
3	Metodologia	10
3.2	Resultados	12
3.2.1	Avaliação de características químicas do solo.....	12
3.2.2	Contaminação do solo por oligoelementos	20
3.2.3	Avaliações biométricas	21
3.2.4	Avaliação nutricional	23
3	Conclusões	26
4	Considerações finais	26
	Referências	26

1 Introdução

A geração de resíduos é uma consequência dos processos industriais de transformação de matéria-prima. Para a indústria de celulose e papel, a destinação final dos mesmos é um grande desafio. O descarte em aterros industriais gera uma responsabilidade *ad eternum* pela guarda dos mesmos e resulta em um custo permanente. Sua disposição em plantios florestais, visando melhorar a fertilidade do solo e manter o estoque de nutrientes no ecossistema, é uma opção que pode ser econômica e ambientalmente interessante, sendo, para isso, necessários testes que avaliem os efeitos dessas aplicações no crescimento das árvores e no ambiente. As avaliações do ambiente devem considerar as duas vertentes de interesse: as alterações na oferta de nutrientes pelo solo e na qualidade física do solo, influenciando a nutrição das plantas; e uma possível fonte de contaminação do solo e da água.

Os resíduos da indústria de celulose e papel apresentam potencial de uso como insumo agrícola/florestal, considerando os seus teores de carbono orgânico e de nutrientes para as plantas. Essa forma de disposição deve ocorrer de maneira cuidadosa, de modo a não provocar danos à saúde pública e ao meio ambiente e ajudando a resolver um problema de passivo ambiental, relacionado à destinação desses resíduos. Para isso, são necessários estudos de viabilidade técnica, tendo em vista a possibilidade da presença de elementos químicos prejudiciais ao ambiente e ao desenvolvimento de espécies florestais de interesse econômico.

As espécies florestais usualmente são plantadas em solos não utilizados para a agricultura, por se caracterizarem pela baixa disponibilidade de nutrientes e com elevada acidez (Reissmann; Wisniewski, 2000; Ferreiro-Domínguez et al., 2014) e, na maioria das vezes, pela topografia inadequada para o cultivo agrícola mecanizado. A ocorrência de sintomas de deficiência nutricional (Reissmann; Wisniewski, 2000, Chaves; Correia, 2005), sugerindo a necessidade de intervenção com uso de nutrientes e/ou corretivo, é comum em algumas regiões, casos de Pirai do Sul, em solos de origem sedimentar.

Resíduos como casca de madeira, lama de cal, lodo celulósico e cinza de caldeira são gerados no processamento da madeira para obtenção da celulose, e a quantidade gerada corresponde à cerca de 15% da quantidade de celulose produzida (Nolasco et al., 2005). Resíduos como a cinza e lama de cal têm elevada concentração de nutrientes tais como K, Ca, Mg e P (Demeyer et al., 2001; Mandre et al., 2006; Martins et al., 2007; Dibdiakova et al., 2015), e a sua aplicação no solo pode resultar em aumento na disponibilidade de nutrientes e redução da acidez (Mandre et al., 2006; Costa et al., 2009). As respostas de espécies florestais à aplicação de resíduo têm sido variáveis (Parn, 2005; Rodrigues et al., 2005; Mandre et al., 2006; Sikstrom et al., 2010). Em geral, a aplicação de resíduos da indústria de celulose em plantios de *Pinus taeda* tem resultado em maiores crescimentos do que a aplicação de fertilizante, possivelmente devido à presença de vários nutrientes nos mesmos (Rodrigues, 2004; Sayer et al., 2004; Albaugh et al., 2008). Sikstrom et al. (2010) constatou aumento na concentração de K, P e Mn e decréscimo de N nas acículas de *Pinus taeda*, avaliado 26 anos após a aplicação dos resíduos. Por sua vez, Varnagiryte-Kabašinskiene et al. (2015) não encontraram variação na concentração de N, P, K, Ca e Mg nas acículas dessa espécie com a aplicação de cinzas. Em condição subtropical, Rodrigues et al. (2005) constatou decréscimo dos teores de N e P e aumento de K, Mg e Ca em acículas de *P. taeda*, como resultado do uso de resíduo da indústria de celulose, sete anos após a sua aplicação.

Devido à necessidade de compreender o efeito da aplicação dos diferentes tipos de resíduos no crescimento das árvores, quando aplicados ao solo, a Iguazu Celulose, Papel S.A. (ICP), localizada

Na Tabela 3 é apresentada a caracterização química do material estudado bem como as quantidades de nutrientes e matéria orgânica agregada nas diferentes doses estudadas.

Tabela 3. Caracterização química da mistura lodo celulósico e cinza de biomassa florestal (proporção 70% e 30%) e quantidades estimadas de nutrientes aplicadas em cada tratamento de doses da mistura estudadas no experimento de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP.

Característica	Teor no resíduo	Doses do resíduo (Mg ha ⁻¹)			
		14	29	45	60
		Quantidades aplicadas (kg ha ⁻¹)			
Matéria Seca (%)	25,4	3557,9	7369,9	11436,0	15248,0
Resíduo Mineral (%)	42,7	5971,0	12368,5	19192,5	25590,0
Nitrogênio (%)	0,9	125,1	259,1	402,0	536,0
P ₂ O ₅ Total (%)	0,4	50,9	105,4	163,5	218,0
K ₂ O (%)	0,5	63,5	131,5	204,0	272,0
MgO (%)	0,8	107,3	222,3	345,0	460,0
CaO (%)	0,7	99,9	206,9	321,0	428,0
Cobre (mg kg ⁻¹)	13,0	0,2	0,4	0,6	0,8
Boro (mg kg ⁻¹)	181,8	2,5	5,3	8,2	10,9
Enxofre (%)	0,8	112,9	233,9	363,0	484,0
Ferro (%)	0,8	109,2	226,2	351,0	468,0
Manganês (mg kg ⁻¹)	537,6	7,5	15,6	24,2	32,3
Zinco (mg kg ⁻¹)	94,6	1,3	2,7	4,3	5,7
Carbono (%)	32,5	4554,2	9404,7	15547,5	19518,0
Matéria Orgânica (%)	56,1	7851,7	16213,9	26802,0	33650,0
Densidade (g cm ⁻³)	0,6	-	-	-	-
Relação C/N	37,5	-	-	-	-
PN* (%)	26,0	-	-	-	-
PRNT** (%)	10,6	-	-	-	-

* poder de neutralização; ** poder relativo de neutralização total.

O efeito da aplicação da mistura na fertilidade do solo foi avaliado pela coleta de amostras de solo, em diferentes tempos, após a aplicação da mistura e em intervalos de profundidade do solo (Tabela 4). Todas as amostras de solo foram analisadas conforme preconiza Silva (1999).

Tabela 4. Época e profundidade de coleta de amostras de solo da área experimental, para avaliação de fertilidade com aplicação de doses da mistura de lodo celulósico e cinza de biomassa florestal em parcelas de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP.

Data	Tempo após aplicação da mistura (meses)	Intervalo de profundidade coletado (cm)				
Dezembro/2011	6	0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60
Julho/2012	12	0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60
Agosto/2013	26	0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60
Outubro/2014	40	0 - 10		10 - 20	20 - 40	-
Agosto/2015	50	0 - 10		10 - 20	20 - 40	-
Junho/2016	60	0 - 10		10 - 20	20 - 40	-

A contaminação do solo por metais pesados foi averiguada em amostras de solo (0-20 cm) de uma repetição dos tratamentos T1 e T5 (Testemunha e dose 60 Mg ha⁻¹ da mistura, coletadas em duas épocas, com as seguintes determinações (teores totais): amostras de 2012, determinação dos teores de chumbo, cromo e cádmio; amostras de 2015 e 2016, determinação dos teores de arsênio, chumbo, cromo, cádmio e mercúrio.

As avaliações biométricas das plantas foram realizadas aos 6, 12, 18, 26, 40, 50 e 60 meses após a aplicação das doses da mistura de lodo e cinza nas parcelas experimentais (respectivamente, dezembro/2011, julho/2012, dezembro/2012, agosto/2013, outubro/2014, agosto/2015 e junho/2016).

Amostras de acículas para a diagnose nutricional foram coletadas em julho/2012, outubro/2014 e junho/2016. As acículas coletadas foram obtidas do verticilo inferior do terço superior da copa, sendo coletadas as últimas acículas recém-maduras.

3.2 Resultados

3.2.1 Avaliação de características químicas do solo

As doses da mistura de lodo e cinza tiveram pouca influência sobre as características químicas do solo, em todas as avaliações realizadas ao longo do tempo, e em todas as profundidades amostradas (Tabelas 5 a 10). Observa-se de forma tênue que, na avaliação aos 60 meses após a aplicação dos tratamentos (Tabela 9), as doses da mistura atuaram para aumentar a oferta de Ca e Mg, ou para diminuir os valores de Al, no complexo de troca dos solos, em relação ao tratamento testemunha. Essa tendência pode ter tido alguma influência sobre o crescimento de *P. taeda*.

Tabela 5. Características químicas do solo da área experimental com a aplicação de doses da mistura (Mg ha^{-1}) de lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *P. taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – avaliação de dezembro/2011, 6 meses após a aplicação dos tratamentos.

Doses	CO g kg^{-1}	pH CaCl_2	P mg dm^{-3}	Al	Ca	Mg	K	SB	V	m	Na	Cu	Zn	Fe	Mn
						$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$			%				mg dm^{-3}		
..... Camada 0 cm a 5 cm															
0	8,65	3,76	3,30	0,99	0,12	0,00	0,03	0,14	2,75	86,84	3,25	0,30 b	0,15	60,50	1,65
14	8,72	3,81	3,81	0,93	0,16	0,00	0,04	0,19	3,26	83,04	3,25	0,32 b	0,30	76,15	1,75
29	8,30	3,77	4,60	0,93	0,11	0,00	0,03	0,14	2,15	86,11	2,00	0,43 a	0,45	72,05	1,98
45	6,30	3,81	5,10	0,77	0,07	0,01	0,03	0,11	2,05	88,51	0,75	0,45 a	0,23	76,13	1,50
60	6,84	3,94	3,64	0,63	0,14	0,01	0,03	0,19	3,47	76,83	1,00	0,47 a	0,23	84,93	1,53
CV (%)	36,81	3,71	43,26	25,06	104,87	344,26	34,35	89,28	92,08	-	67,97	19,47	77,47	36,98	50,31
..... Camada 5 cm a 10 cm															
0	6,44	3,93	1,80	0,76	0,11	0,00	0,02	0,13	3,04	85,39	3,50 a	0,40	0,23	61,85	1,25
14	6,18	3,89	1,71	0,73	0,11	0,00	0,03	0,13	2,83	84,88	2,25 b	0,48	0,18	91,18	1,28
29	4,82	3,88	2,16	0,70	0,05	0,00	0,02	0,07	1,44	90,91	1,00 c	0,48	0,20	84,53	0,98
45	4,46	3,87	2,16	0,62	0,05	0,02	0,02	0,09	2,06	87,32	0,75 c	0,55	0,20	77,45	1,45
60	5,36	4,03	1,59	0,51	0,06	0,00	0,03	0,09	2,08	85,00	0,50 c	0,58	0,23	93,93	1,43
CV (%)	40,43	3,19	44,97	18,63	107,72	244,74	30,94	85,28	95,33	-	45,29	18,72	48,17	23,86	30,28
..... Camada 10 cm a 20 cm															
0	6,41	4,00	0,34	0,64	0,09	0,00	0,02	0,11	2,99	85,33	3,00	0,48	0,18	83,13	0,88
14	4,09	4,02	2,36	0,51	0,06	0,02	0,02	0,10	2,55	83,61	1,75	0,50	0,18	69,03	1,28
29	2,83	4,01	0,69	0,57	0,03	0,00	0,02	0,05	1,27	91,94	1,25	0,55	0,30	69,48	0,93
45	3,44	4,01	0,27	0,45	0,03	0,01	0,02	0,06	1,65	88,24	1,25	0,50	0,18	84,78	1,33
60	3,97	4,10	0,57	0,38	0,04	0,00	0,02	0,06	1,77	84,44	0,75	0,45	0,20	94,68	1,83
CV (%)	60,43	1,58	155,25	23,42	90,71	286,46	27,21	59,30	69,74	-	69,88	27,96	68,55	30,91	36,98

Continua...

Tabela 5. Continuação...

Doses	CO g kg ⁻¹	pH CaCl ₂	P mg dm ⁻³	Al	Ca	Mg	K	SB	V	m	Na	Cu	Zn	Fe	Mn
						cmol _c dm ⁻³			%				mg dm ⁻³		
..... Camada 20 cm a 40 cm															
0	3,80	4,07 b	0,38	0,63	0,06	0,00	0,02	0,08	2,26	88,73	3,00 a	0,55	0,14	87,73	1,73
14	4,43	4,07 b	0,38	0,43	0,05	0,00	0,02	0,07	2,01	84,31	2,00 a	0,50	0,23	70,30	2,05
29	4,17	4,06 b	0,48	0,45	0,03	0,00	0,03	0,06	1,85	88,24	1,50 b	0,65	0,18	88,00	1,53
45	2,67	4,09 b	0,09	0,41	0,03	0,00	0,02	0,05	1,40	89,13	0,50 b	0,50	0,18	75,73	1,98
60	2,98	4,15 a	0,44	0,37	0,03	0,00	0,02	0,06	1,74	86,05	0,50 b	0,53	0,15	91,13	2,48
CV (%)	37,78	0,92	109,14	28,21	73,78	447,21	57,58	61,05	58,49	-	53,05	19,96	71,69	26,15	37,26
..... Camada 40 cm a 60 cm															
0	3,20	4,10	0,21	0,43 a	0,04	0,00	0,02	0,06	1,65	89,58	3,25 a	0,48	0,13	72,75	1,77 c
14	3,53	4,12	0,17	0,44 a	0,06	0,00	0,02	0,08	2,36	84,62	1,75 b	0,58	0,10	64,53	3,30 b
29	2,74	4,10	0,19	0,41 a	0,05	0,00	0,02	0,07	1,96	85,42	1,25 b	0,65	0,15	107,55	3,25 b
45	3,81	4,13	0,20	0,36 b	0,03	0,00	0,02	0,05	1,48	87,80	0,25 c	0,53	0,20	82,08	4,65 a
60	2,77	4,16	0,04	0,33 b	0,03	0,00	0,03	0,06	1,86	84,62	0,25 c	0,55	0,18	88,38	4,20 a
CV (%)	41,41	0,81	155,56	9,86	71,34	-	59,10	63,77	60,39	-	46,85	19,25	26,53	28,86	20,45

¹ SB = soma de bases; t = capacidade de troca catiônica efetiva; V = saturação por bases na capacidade de troca catiônica. Não ocorreram diferenças significativas entre as médias de cada atributo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Tabela 6. Características químicas do solo da área experimental, em diferentes profundidades, com aplicação de doses da mistura (Mg ha^{-1}) de lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – avaliação em julho/2012, 12 meses após a aplicação dos tratamentos.

Dose da mistura	CO	P	pH CaCl ₂	Al	H+Al	Ca	Mg	K	SB	T	V	m
	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³					%			
..... 0 cm a 5 cm												
0	9,98	6,33	3,70	1,33	7,10	0,13	0,18	0,01 b	0,32	7,41	5,00	81,00
14	10,58	11,03	3,70	1,24	6,83	0,10	0,20	0,01 b	0,32	7,14	4,00	80,00
29	9,95	9,63	3,80	1,05	5,96	0,15	0,25	0,02 a	0,43	6,39	7,00	71,00
45	12,13	8,17	3,80	1,10	6,77	0,20	0,23	0,03 a	0,46	7,23	7,00	70,00
60	9,78	9,38	3,80	1,03	6,48	0,25	0,20	0,03 a	0,48	6,96	8,00	68,00
CV (%)	29,99	30,40	5,00	25,19	23,88	53,60	32,24	24,14	35,76	22,28	51,50	13,50
..... 5 cm a 10 cm												
0	5,43	3,10	4,00	0,80	4,12	0,10	0,18	0,01 b	0,29	4,40	7,00	73,00
14	5,65	3,40	4,00	0,73	3,73	0,10	0,15	0,01 b	0,26	3,99	7,00	73,00
29	6,50	3,48	4,00	0,78	4,10	0,10	0,20	0,02 a	0,32	4,42	7,00	70,00
45	5,30	3,20	4,10	0,65	3,71	0,10	0,18	0,02 a	0,30	4,01	7,00	68,00
60	6,08	3,60	4,00	0,68	3,93	0,13	0,18	0,02 a	0,32	4,25	8,00	68,00
CV (%)	36,03	34,80	3,80	28,80	20,96	21,29	41,40	28,24	25,24	19,86	28,40	11,30
..... 10 cm a 20 cm												
0	3,48	1,50	4,10	0,60	3,31	0,10	0,15	0,01	0,26	3,57	7,00	70,00
14	4,13	1,58	4,20	0,53	3,26	0,10	0,18	0,01	0,29	3,54	8,00	65,00
29	3,75	2,03	4,20	0,53	3,22	0,10	0,20	0,01	0,31	3,53	9,00	62,00
45	3,70	1,48	4,10	0,55	3,30	0,10	0,20	0,01	0,31	3,62	9,00	64,00
60	4,55	1,68	4,10	0,55	3,32	0,10	0,13	0,02	0,24	3,56	7,00	69,00
CV (%)	17,65	31,3	3,10	21,83	13,03	0,00	38,35	31,37	22,84	11,72	21,70	13,10
..... 20 cm a 40 cm												
0	4,28	1,20	4,20	0,55	3,02	0,10	0,15	0,01	0,26	3,28	8,00	68,00
14	3,68	0,98	4,20	0,49	2,85	0,10	0,15	0,01	0,26	3,11	8,00	65,00
29	3,30	1,28	4,20	0,53	3,02	0,10	0,13	0,01	0,24	3,25	7,00	69,00
45	3,10	0,95	4,20	0,48	2,90	0,10	0,13	0,01	0,24	3,14	8,00	67,00
60	4,10	0,90	4,20	0,55	3,18	0,10	0,13	0,01	0,24	3,42	7,00	70,00
CV (%)	19,99	34,97	2,20	20,91	8,83	0,00	38,84	21,30	21,83	8,23	21,80	10,60

¹ SB = soma de bases; T = capacidade de troca de cátions ao pH 7,0; V = saturação por bases na T; m = saturação por Al na T. Não ocorreram diferenças significativas entre as médias de cada atributo pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Tabela 7. Características químicas do solo do local experimental, em diferentes profundidades, com aplicação de doses da mistura (Mg ha^{-1}) de lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – avaliação em agosto/2013, 24 meses após a aplicação dos tratamentos.

Doses	CO g kg ⁻¹	P mg dm ⁻³	pH CaCl ₂	Al	Ca	Mg	K	sb	V	m	Cu	Zn	Fe	Mn
				cmol _c dm ⁻³				%		mg dm ⁻³				
..... 0 cm a 10 cm														
0	9,60	4,30	3,70	1,40	0,10	0,10	0,02	0,22	3,26	85,94	0,23	1,57	51,27	1,59
14	10,10	6,30	3,63	1,45	0,10	0,10	0,02	0,22	3,02	86,59	0,18	0,10	54,63	1,13
29	11,98	5,28	3,63	1,35	0,10	0,10	0,02	0,22	3,09	85,84	0,28	0,10	55,03	1,15
45	9,40	5,38	3,68	1,38	0,10	0,10	0,02	0,27	3,97	83,40	0,20	0,20	54,95	0,64
60	11,75	5,08	3,68	1,38	0,13	0,10	0,03	0,38	5,34	78,58	0,28	0,13	56,53	0,80
CV (%)	22,60	30,42	3,47	19,60	74,91	0,00	26,56	40,93	53,70	7,90	39,30	289,00	7,70	411,00
..... 10 cm a 20 cm														
0	7,20	2,00	3,93 a	0,83	0,10	0,10	0,02	0,22	4,48	78,73	0,10	0,10	68,97	1,37 a
14	6,68	2,70	3,88 b	0,90	0,10	0,10	0,01	0,21	4,25	80,73	0,08	0,10	62,48	0,58 b
29	6,68	2,35	3,85 b	0,88	0,10	0,10	0,02	0,22	4,30	79,94	0,10	0,10	61,78	1,23 a
45	8,50	3,00	3,93 a	0,90	0,10	0,10	0,02	0,22	4,79	80,63	0,13	0,13	65,95	0,41 b
60	8,73	2,90	3,88 b	0,98	0,13	0,10	0,02	0,24	4,72	79,86	0,08	0,10	63,88	1,40 a
CV (%)	28,68	44,76	1,07	15,67	21,30	0,00	31,74	10,45	15,90	3,70	70,00	21,90	11,40	48,00
..... 20 cm a 40 cm														
0	7,50	2,73	4,03	0,73	0,10	0,10	0,01	0,21	4,67	77,29	0,20	0,10	59,13	1,20
14	5,55	1,70	3,98	0,68	0,10	0,10	0,01	0,21	5,19	76,21	0,18	0,10	55,28	0,58
29	5,33	1,60	3,98	0,75	0,20	0,10	0,01	0,31	7,35	72,31	0,23	1,20	54,20	49,38
45	6,00	1,58	3,98	0,75	0,10	0,10	0,01	0,21	4,96	77,87	0,14	0,18	61,80	0,50
60	6,45	1,03	3,95	0,80	0,10	0,10	0,02	0,22	4,46	78,61	0,25	0,20	55,25	0,68
CV (%)	32,86	61,19	1,21	11,24	74,54	0,00	34,86	38,60	33,10	6,00	55,00	267,00	10,40	420,00

¹ SB = soma de bases; T = capacidade de troca de cátions ao pH 7,0; V = saturação por bases na T; m = saturação por Al na T. Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Ausência de letras indica igualdade pelo mesmo teste.

Tabela 8. Características químicas do solo da área experimental, em diferentes profundidades, com aplicação de doses da mistura (Mg ha^{-1}) de lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – avaliação em outubro/2014, 40 meses após a aplicação dos tratamentos.

Doses da mistura	CO	P	pH CaCl ₂	Al	H+Al	Ca	Mg	K	SB	T	V	m
	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³					%			
..... 0 cm a 10 cm												
0	10,08	4,45	3,70	1,43	6,93	0,10	0,10	0,02	0,22	7,15	3,00	86,00
14	10,10	6,30	3,60	1,45	7,60	0,10	0,10	0,02	0,22	7,82	3,00	87,00
29	11,98	5,28	3,60	1,35	7,00	0,10	0,10	0,02	0,22	7,22	3,00	86,00
45	9,40	5,38	3,70	1,38	6,53	0,15	0,10	0,02	0,27	6,80	4,00	83,00
60	11,75	5,08	3,70	1,38	7,25	0,25	0,10	0,03	0,38	7,63	5,00	79,00
CV (%)	22,60	30,72	3,50	19,60	25,00	74,91	0,00	26,56	40,93	23,89	53,70	7,90
..... 10 cm a 20 cm												
0	6,90	2,28	4,00 a	0,83	4,75	0,10	0,10	0,02	0,22	4,97	5,00	79,00
14	6,68	2,70	3,90 b	0,90	4,83	0,10	0,10	0,01	0,21	5,04	4,00	81,00
29	6,68	2,35	3,90 b	0,88	4,88	0,10	0,10	0,02	0,22	5,09	4,00	80,00
45	8,50	3,00	3,90 a	0,90	4,33	0,10	0,10	0,02	0,22	4,54	5,00	81,00
60	8,73	2,90	3,90 b	0,98	4,95	0,13	0,10	0,02	0,24	5,19	5,00	80,00
CV (%)	26,80	44,33	1,10	15,67	15,05	21,30	0,00	31,77	10,46	14,42	15,90	3,80
..... 20 cm a 40 cm												
0	7,58	2,43	4,00	0,73	4,33	0,10	0,10	0,01	0,21	4,54	5,00	77,00
14	5,55	1,70	4,00	0,68	3,85	0,10	0,10	0,01	0,21	4,06	5,00	76,00
29	5,33	1,60	4,00	0,75	3,78	0,20	0,10	0,01	0,31	4,09	7,00	72,00
45	6,00	1,58	4,00	0,75	4,08	0,10	0,10	0,01	0,21	4,29	5,00	78,00
60	6,45	1,03	4,00	0,80	4,65	0,10	0,10	0,02	0,22	4,87	4,00	79,00
CV (%)	32,80	61,19	1,20	11,24	1019,00	74,54	0,00	34,86	38,59	10,34	33,20	6,00

¹ SB = soma de bases; T = capacidade de troca de cátions ao pH 7,0; V = saturação por bases na T; m = saturação por Al na T. Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Ausência de letras indica igualdade pelo mesmo teste.

Tabela 9. Características químicas do solo da área experimental, em diferentes profundidades, com aplicação de doses da mistura (Mg ha^{-1}) de lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – avaliação em agosto/2015, 50 meses após a aplicação dos tratamentos.

Doses da mistura	CO	P	pH CaCl ₂	Al	H+Al	Ca	Mg	K	SB	T	V	m
	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³		cmol _c dm ⁻³					%			
..... 0 cm a 10 cm												
0	2,13	5,71	4,30	1,50	6,71	0,23 b	0,11 b	0,04	0,34 b	8,55	4,00 b	80,00 a
14	1,53	4,98	4,10	1,25	5,59	0,21 b	0,11 b	0,03	0,31 b	7,15	4,00 ab	80,00 a
29	2,04	5,74	4,30	1,45	8,18	0,39 b	0,18 a	0,04	0,57 b	10,20	7,00 ab	69,00 ab
45	1,45	5,77	4,30	1,13	5,71	0,39 b	0,19 a	0,05	0,58 b	7,41	9,00 ab	64,00 ab
60	1,22	4,78	4,30	0,95	6,00	0,68 a	0,21 a	0,04	0,89 a	7,84	14,00 a	49,00 b
CV (%)	36,00	40,11	8,90	46,67	45,00	36,3	15,49	50,11	28,10	27,80	65,80	21,30
..... 10 cm a 20 cm												
0	1,39	3,36	4,40	0,80	3,88	0,18 b	0,10 c	0,025 ab	0,27 b	4,96	6,00 b	72,00 a
14	0,94	3,58	4,50	0,73	3,40	0,19 b	0,11 c	0,021 b	0,31 b	4,43	7,00 b	69,00 a
29	1,06	2,92	4,20	0,83	4,06	0,19 b	0,13 bc	0,024 ab	0,32 b	5,21	7,00 b	70,00 a
45	0,99	2,76	4,50	0,70	3,41	0,27 b	0,16 b	0,031 a	0,43 b	4,54	10,00 ab	61,00 ab
60	0,83	2,54	4,30	0,55	3,34	0,48 a	0,21 a	0,029 ab	0,70 a	4,59	16,00 a	43,00 b
CV (%)	36,50	48,60	5,50	36,70	33,23	32,80	18,20	16,05	25,80	30,70	38,00	18,00
..... 20 a 40 cm												
0	0,86	1,79	4,40	0,45	2,81	0,14 b	0,08 c	0,02	0,24 c	3,50	7,00 b	61,00
14	0,62	1,64	4,60	0,55	2,41	0,18 ab	0,10 bc	0,02	0,30 bc	3,26	9,00 ab	64,00
29	0,67	1,50	4,40	0,63	2,75	0,18 ab	0,13 abc	0,02	0,33 bc	3,71	9,00 ab	64,00
45	0,75	1,57	4,30	0,60	2,88	0,25 ab	0,14 ab	0,03	0,41 ab	3,90	11,00 ab	58,00
60	0,62	1,71	4,60	0,50	2,63	0,32 a	0,15 a	0,03	0,50 a	3,63	14,00 a	50,00
CV (%)	30,50	30,50	4,20	36,90	21,30	33,00	21,60	26,00	22,60	20,80	29,20	24,20

¹ SB = soma de bases; T = capacidade de troca de cátions ao pH 7,0; V = saturação por bases na T; m = saturação por Al na T. Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Ausência de letras indica igualdade pelo mesmo teste.

Tabela 10. Características químicas do solo da área experimental, em diferentes profundidades, com aplicação de doses da mistura (Mg ha^{-1}) do lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – avaliação em junho/2016, 60 meses após a aplicação dos tratamentos.

Doses da mistura	CO g kg^{-1}	P mg dm^{-3}	pH CaCl_2	Al	H+Al	Ca	Mg	K	SB	T	V	m
							$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$				%	
..... 0 cm a 10 cm												
0	1,79	3,49	4,30	1,48 a	8,26 a	0,18	0,10	0,02	0,30	8,56 a	4,00 b	83,00 a
14	1,87	6,01	4,10	1,40 a	6,23 b	0,29	0,10	0,04	0,42	6,65 b	6,00 b	77,00 a
29	1,44	4,97	4,10	1,33 a	6,80 b	0,25	0,10	0,03	0,37	7,18 b	6,00 b	77,00 a
45	1,22	3,78	4,40	1,02 b	5,20 c	0,40	0,10	0,03	0,53	5,73 c	9,00 a	66,00 b
60	1,19	5,93	4,60	0,90 b	3,67 d	0,43	0,10	0,05	0,58	4,26 c	13,00 a	62,00 b
CV (%)	39,50	42,10	7,20	22,10	19,10	53,70	0,00	65,50	41,00	18,00	48,50	12,20
..... 10 cm a 20 cm												
0	0,83	2,69	4,30 b	1,00	4,63	0,18	0,10	0,02	0,30	4,93	6,00 b	77,00 a
14	1,20	2,97	4,30 b	1,10	5,67	0,22	0,10	0,02	0,34	6,00	6,00 b	75,00 a
29	0,66	2,71	4,10 b	0,80	4,09	0,18	0,10	0,02	0,30	4,39	7,00 b	72,00 a
45	0,77	2,24	4,60 a	0,75	3,15	0,29	0,10	0,02	0,41	3,56	13,00 a	63,00 b
60	0,73	3,44	4,70 a	0,58	3,20	0,31	0,10	0,04	0,45	3,65	16,00 a	57,00 b
CV (%)	45,00	48,00	6,00	34,00	46,00	42,00	0,00	94,00	32,00	41,00	56,00	14,00
..... 20 cm a 40 cm												
0	0,41	1,65	4,40 b	0,57 ab	3,54	0,20	0,10	0,01	0,31	3,85	8,00 b	65,00
14	0,68	1,82	4,30 b	0,70 a	3,20	0,17	0,10	0,01	0,28	3,48	8,00 b	71,00
29	0,40	1,73	4,30 b	0,57 ab	2,90	0,15	0,10	0,01	0,27	3,17	8,00 b	68,00
45	0,37	1,49	4,40 b	0,50 b	3,21	0,17	0,10	0,01	0,28	3,49	9,00 b	64,00
60	0,60	1,64	4,80 a	0,47 b	1,66	0,26	0,10	0,01	0,38	2,04	18,00 a	56,00
CV (%)	42,50	26,20	4,10	19,20	34,00	40,00	0,00	47,00	27,00	30,00	33,00	12,00

¹ SB = soma de bases; T = capacidade de troca de cátions ao pH 7,0; V = saturação por bases na T; m = saturação por Al na T. Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Ausência de letras indica igualdade pelo mesmo teste.

3.2.2 Contaminação do solo por oligoelementos

A amostragem realizada para a observação da contaminação do solo por oligoelementos, a partir da aplicação da mistura de lodo e cinza de caldeira, foi exploratória, considerando que os tipos de resíduos testados apresentaram baixos teores de metais pesados. No processo de avaliação do resíduo para fins de classificação, o mesmo não apontou teores de oligoelementos que o qualificassem como Classe I (resíduo perigoso).

Nas amostras avaliadas (Tabelas 11 e 12), ocorreram apenas dois valores acima dos estabelecidos em norma da Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB) (2005). Ambos foram relativos aos teores de Cr (limite de 40 mg kg⁻¹), um na amostra da camada 40-60 cm do tratamento testemunha (teor de Cr = 123 mg kg⁻¹) e outro na camada 10-20 cm do tratamento com dose da mistura de 60 Mg ha⁻¹ (45 mg kg⁻¹). Esses dois valores, acima do limite estabelecido, parecem estar mais associados com algum erro de análise, de contaminação da amostra ou mesmo da variabilidade espacial na concentração do mesmo. No caso da amostra de solo da parcela do tratamento sem aplicação de resíduos essa associação é óbvia. No caso da amostra de solo do tratamento com dose da mistura de 60 Mg ha⁻¹, é importante lembrar que o resíduo foi caracterizado anteriormente (conforme “Resumo dos Resultados da Amostra nº 36723/2013-0”, inserido no Processo Comercial nº 3381/2013-1 de 04/04/2013, solicitado pela ICP) e o teor de Cr encontrado no resíduo analisado não justifica o teor de Cr encontrado na referida amostra.

Tabela 11. Percentagem de sólidos e teores totais de chumbo, cromo e cádmio em amostras de solo da área experimental com aplicação de lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – avaliação em dezembro/2011, seis meses após a aplicação dos tratamentos.

	Tratamento										Valor de referência ¹
	0 (Mg ha ⁻¹)					60 (Mg ha ⁻¹)					
Camada (cm)	0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60	0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60	-
Sólidos (%)	99,3	99,3	99,2	99,4	99,4	99,2	99,5	99,4	99,6	99,5	-
Pb (mg kg ⁻¹)	13	9,2	10	9,7	9,3	7,3	7,8	7,9	7,2	6,6	17
Cr (mg kg ⁻¹)	29	22	18	14	123	22	20	45	25	15	40
Cd (mg kg ⁻¹)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,5

¹ CETESB. Decisão de diretoria número 195/2005 – Disponível em http://www.cetesb.sp.gov.br/media/files/Solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf, acesso em 14/11/2013.

Tabela 12. Teores totais e valores de referência - VR (mg kg⁻¹) de mercúrio, arsênio, chumbo, cromo e cádmio em amostras de solo da camada 0-20 cm, submetida à aplicação de doses da mistura de lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *Pinus taeda*, em Pirai do Sul, na Fazenda Boqueirão da ICP, em avaliações realizadas em 2011, 2015 e 2016.

Elemento	0 (Mg ha ⁻¹)			60 (Mg ha ⁻¹)			VR*
	2011	2015	2016	2011	2015	2016	
Hg	*	0,07	0,02	*	0,06	0,01	0,05
As	*	0,05	<2	*	0,04	<2	3,5
Pb	11,5	1,32	8,75	7,7	1,44	9	17
Cr	23,5	1,67	8	33	1,64	8	40
Cd	<0,1	0,05	<0,2	<0,1	0,05	<0,2	<0,5

* http://www.cetesb.sp.gov.br/media/files/Solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf, acesso em 14/11/2013.

3.2.3 Avaliações biométricas

Não foram observados efeitos significativos ($p \leq 5\%$) no desenvolvimento das plantas, em função das diferentes doses da mistura lodo e cinza, na avaliação realizada aos 6 meses após a implantação do experimento.

Nas avaliações realizadas aos 12, 18, 26, 40, 50 e 60 meses após a implantação do experimento, ocorreu efeito quadrático das doses da mistura aplicada no crescimento em altura das árvores de *P. taeda*. As doses da mistura responsáveis pelas alturas máximas dentro de cada época de avaliação, conforme as equações quadráticas definidas, variaram de 38 a 43 Mg ha^{-1} (Figura 1).

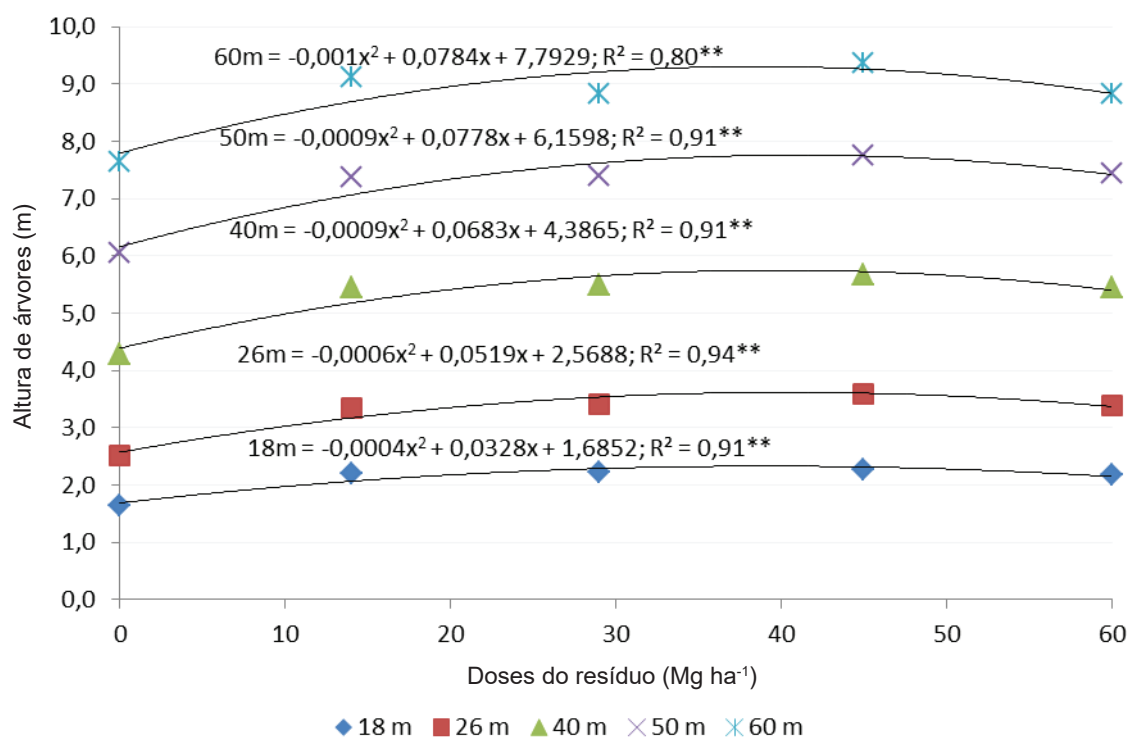


Figura 1. Altura de árvores em diferentes épocas de avaliação do experimento, com aplicação de doses da mistura de lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – Avaliações (número de meses após aplicação do tratamento e data): 6 meses (novembro/11); 12 meses (julho/12); 18 meses (novembro/12); 26 meses (agosto/13); 40 meses (outubro/2014); 50 meses (agosto/15) e 60 meses (junho/16).

Para o diâmetro à altura do peito (DAP), com avaliações a partir dos 18 meses após a aplicação dos resíduos, o efeito dos tratamentos também foi quadrático. As doses da mistura responsáveis pelos DAPs máximos dentro de cada época de avaliação, conforme as equações quadráticas definidas, variaram entre 39 Mg ha^{-1} e 45 Mg ha^{-1} (Figura 2), intervalo muito próximo do encontrado para as alturas máximas de planta.

Por conseguinte, com os dados de altura máxima e de DAP gerados pelos diferentes tratamentos (doses da mistura), foram calculados os valores de volume sólido de madeira (fator de forma 0,40), repetindo-se o efeito quadrático em todas as épocas de avaliação. As doses da mistura responsáveis pelos volumes sólidos de madeira máximos dentro de cada época de avaliação, conforme as equações quadráticas definidas, variaram entre 43 Mg ha^{-1} e 44 Mg ha^{-1} (Figura 3).

Os resultados alcançados nas medidas biométricas remetem a um efeito positivo do uso da mistura lodo e cinza, no crescimento do povoamento de pinus, para as condições do estudo. Um questio-

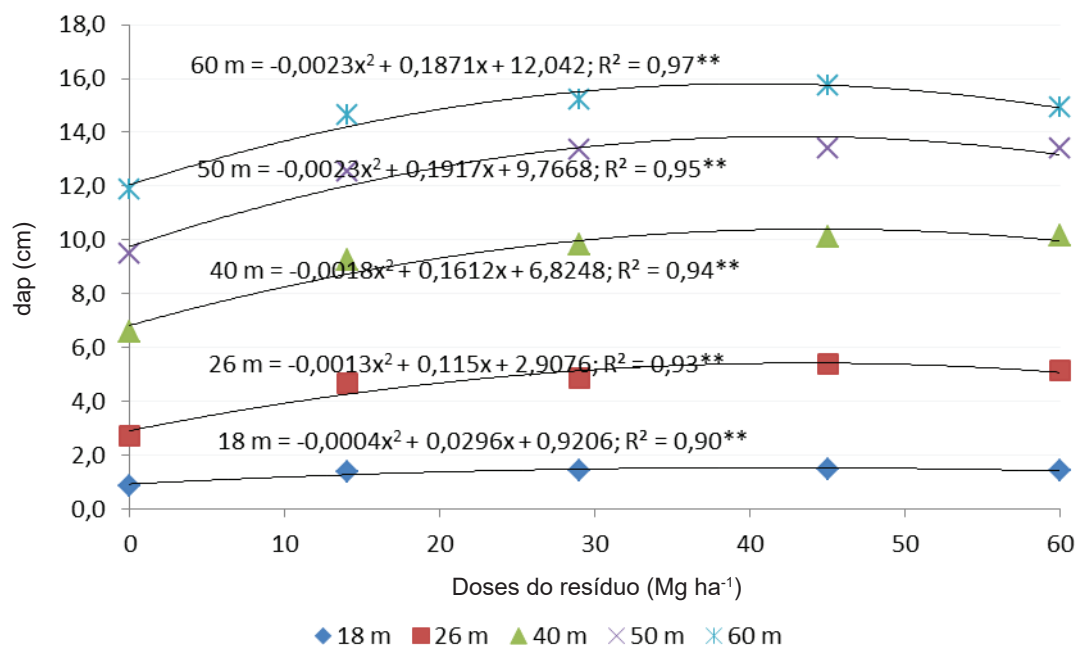


Figura 2. Diâmetro à altura do peito (DAP) de árvores em diferentes épocas de avaliação do experimento, com aplicação de doses da mistura lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *P. taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – Avaliações (número de meses após aplicação do tratamento e data): 18 meses (novembro/12); 26 meses (agosto/13); 40 meses (outubro/2014); 50 meses (agosto/15) e 60 meses (junho/16).

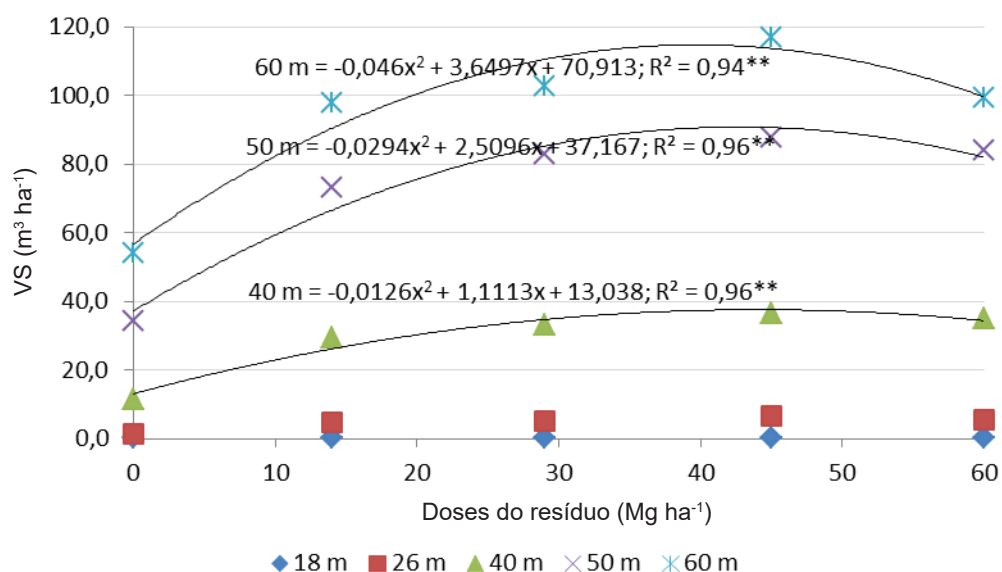


Figura 3. Volume sólido de madeira de árvores em diferentes épocas de avaliação do experimento, com aplicação de doses da mistura de lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – Avaliações (número de meses após aplicação do tratamento e data): 18 meses (novembro/12); 26 meses (agosto/13); 40 meses (outubro/2014); 50 meses (agosto/15) e 60 meses (junho/16). Fator forma 0,4.

namento que pode ser feito é o porquê da quase ausência de efeito da aplicação da mistura sobre as características de solo. Como hipótese, sendo que a mistura foi deixada sobre o solo (não incorporada), as raízes finas de pinus utilizaram suas próprias características positivas (nutrientes e água disponível) sem que essas doses da mistura tenham tido tempo de influenciar de forma mais incisiva o material do solo. É importante realçar que o solo do local experimental apresenta forte limitação ao uso por deficiências de água e de nutrientes, possibilitando que o efeito da mistura tenha sido efetivamente profícuo aos atributos de crescimento das árvores de *P. taeda*, respeitando-se a dose efetiva máxima em função do comportamento quadrático desses efeitos.

3.2.4 Avaliação nutricional

A avaliação do estado nutricional das árvores de *P. taeda* foi, por vezes, contraditória e, certamente, influenciada pelo efeito de diluição dos diferentes ritmos de crescimento das parcelas experimentais, em função dos tratamentos (Tabelas 13, 14 e 15).

Entre os macronutrientes, o S foi o único que não apresentou diferença significativa para nenhum dos tempos de avaliação. De forma geral, com o passar do tempo, os teores dos macronutrientes ou não variaram entre os tratamentos ou ficaram maiores nos tratamentos que receberam as maiores doses da mistura lodo e cinza.

Entre os micronutrientes, Fe e Cu não apresentaram diferença significativa para nenhum dos tempos de avaliação. O teor foliar de Mn parece ser o típico caso do efeito de diluição provocado pelo efeito positivo das doses da mistura nos atributos de crescimento de *Pinus taeda* ou da redução da sua disponibilidade no solo. Os teores de B do tratamento testemunha sempre foram inferiores a, pelo menos, um dos tratamentos com aplicação da mistura, com destaque para a dose de 45 Mg ha⁻¹.

Considerando os teores dos elementos disponíveis na mistura aplicada e os teores foliares obtidos, os resultados dos elementos K e B são os de relação de causa e efeito mais direta, desde que os mesmos apresentam boa oferta a partir da cinza de caldeira presente na mistura.

Tabela 13. Teores de nutrientes em amostras de acículas obtidas na área experimental, com aplicação de doses da mistura de lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – avaliação em julho/2012, doze meses após a aplicação dos tratamentos.

Doses (Mg ha ⁻¹)	N	P	K	Na	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
	g kg ⁻¹							mg kg ⁻¹				
0	21,73a	2,68a	3,82b	0,11	1,23	0,71	1,17	69,50	1.225,9 a	23,50	53,00	14,00b
14	18,87b	2,76a	4,70a	0,12	1,24	0,73	1,28	66,50	768,2 b	21,50	49,00	18,48b
29	18,74b	1,79b	5,35a	0,12	1,24	0,69	1,57	67,00	678,5 b	21,75	50,00	40,03a
45	18,80b	1,70b	4,85 a	0,10	1,10	0,63	1,37	65,25	508,3 c	26,00	44,00	46,80a
60	18,78b	1,61b	4,27 b	0,11	1,38	0,68	1,45	67,00	489,9 c	24,25	50,00	43,80a
p	0	0	0	ns	ns	ns	ns	0	ns	ns	ns	0
CV (%)	4,29	11,57	11,70	13,44	11,27	7,74	14,78	7,08	18,20	13,51	9,35	26,12

Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Ausência de letras indica igualdade pelo mesmo teste.

Tabela 14. Teores de nutrientes em amostras de acículas obtidas na área experimental, com aplicação de doses da mistura de lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – avaliação em outubro/2014, 40 meses após a aplicação dos tratamentos.

Doses (Mg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
	g kg ⁻¹							mg kg ⁻¹			
0	17,20 b	1,40 b	2,72 b	2,10 b	0,54 c	0,40	131,52	1.132,50 a	3,04	19,34 b	11,86 b
14	17,96 b	1,64 a	3,94 a	2,92 a	0,72 b	0,56	160,86	623,64 b	2,96	23,22 b	18,86 a
29	17,80 b	1,56 a	4,40 a	2,92 a	0,78 b	0,52	162,54	594,40 b	3,60	24,38 b	18,42 a
45	18,34 a	1,66 a	4,92 a	3,40 a	0,92 a	0,54	155,08	643,10 b	3,64	26,64 a	22,62 a
60	18,96 a	1,72 a	4,68 a	3,58 a	0,90 a	0,54	150,20	544,14 b	3,88	29,36 a	20,34 a
p	0	0	0	0	0	ns	ns	0	ns	0,02	0
CV (%)	3,66	7,12	3,11	17,04	14,86	13,5	13,53	18,02	22,37	16,58	13,78

Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Ausência de letras indica igualdade pelo mesmo teste.

Tabela 15. Teores de nutrientes em amostras de acículas obtidas na área experimental, com aplicação de doses da mistura de lodo celulósico e cinza de caldeira em parcelas de *Pinus taeda*, na fazenda Boqueirão da ICP – avaliação em junho/2016, 60 meses após a aplicação dos tratamentos.

Doses (Mg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
0	15,10	1,40	4,53 b	1,20 b	0,30 c	0,80	54,20	1.065,8 a	6,00	33,70	13,83 b
14	15,00	1,60	4,62 b	2,90 b	0,62 b	0,88	61,70	923,72 a	5,40	31,00	14,25 b
29	14,00	1,50	4,62 b	2,20 b	0,60 b	0,68	57,50	676,62 b	4,90	28,90	16,92 b
45	14,20	1,50	5,30 a	1,60 a	0,40 c	0,80	60,00	619,80 b	7,00	28,20	22,30 a
60	14,10	1,60	5,47 a	3,00 a	0,90 a	0,85	60,10	513,47 b	5,30	27,20	16,92 b
p	ns	ns	0,03	0,03	0,03	ns	ns	0,00	ns	ns	0,00
CV (%)	5,78	16,10	8,91	38,94	31,72	17,71	22,14	21,62	11,19	14,17	16,40

Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem significativamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Ausência de letras indica igualdade pelo mesmo teste.

3 Conclusões

A aplicação do resíduo resultou em aumentos no crescimento das árvores de *Pinus taeda*, medidos pela altura das árvores, diâmetro à altura do peito e volume sólido de madeira. A máxima eficiência técnica ao crescimento das árvores foi observada mediante aplicação de doses em torno de 40 Mg ha⁻¹.

Mesmo quando os efeitos da aplicação do resíduo foram não significativos para qualquer uma das características de fertilidade do solo avaliadas, casos dos anos 2013 e 2014, houve efeito significativo ao crescimento das árvores de *Pinus taeda*.

Apesar das restritas mudanças observadas em características da fertilidade do solo dos tratamentos estudados, houve mudanças nos teores de alguns nutrientes avaliados nas acículas.

Não se observou indícios de alterações em teores de oligoelementos na camada de 0-20 cm.

4 Considerações finais

O grande volume de radicelas (raízes finas) observado na serapilheira em decomposição dos povoamentos de *Pinus taeda* contribuiu de forma efetiva na absorção de nutrientes necessários ao seu desenvolvimento. De outra forma, as acículas que caem na superfície do solo demoram a contribuir para a reciclagem de nutrientes e nutrição do povoamento, esperando para isso de 2 a 3 anos, mas sendo importantes para protegerem o solo do impacto das chuvas, evitando processos erosivos e melhorando o processo de armazenamento de água no solo. A adição da mistura lodo celulósico e cinza de caldeira, até certa dosagem, parece ter contribuído ao desenvolvimento de radicelas nas condições dos solos desse experimento, que são muito arenoquartzosos. Esse efeito positivo foi constatado pelas medições biométricas das plantas de *Pinus taeda*, mas não refletido de forma clara nos atributos químicos do solo. Dessa forma, será importante para futuros estudos o monitoramento do volume e das características químicas da serapilheira, procurando correlacionar essas medições com o efeito dos tratamentos testados ao crescimento/produtividade dos povoamentos de pinus.

Na época do corte raso que, segundo o protocolo da empresa, dar-se-á quando os plantios alcançarem a idade aproximada de 14 anos (2025), será possível a avaliação final do ensaio quanto aos efeitos dos tratamentos aplicados, após a quantificação real do volume de madeira produzida nos diferentes sortimentos.

Referências

ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; FOX, T. R. Nutrient use and uptake in *Pinus taeda*. **Tree Physiology**, v. 28, p. 1083-1098, 2008.

CHAVES, R. Q.; CORRÊA, G. F. Macronutrientes no sistema solo: *Pinus caribaea* Morelet em plantios apresentando amarelecimento das acículas e morte das plantas. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 691-700, 2005. DOI: 10.1590/S0100-67622005000500004.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL. **Decisão de diretoria nº 195-2005– E, de 23 de novembro de 2005**. Dispõe sobre a aprovação dos valores orientadores para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo – 2005, em substituição aos valores orientadores de 2001, e dá outras providências.. Disponível em: <https://www.ministeriodesalud.go.cr/gestores_en_salud/pozoAB-1089/tabela_valores_2005.pdf>. Acesso em: 11 out. 2018.

COSTA, E. R. O.; RIZZI, N. E.; SILVA, H. D.; MAEDA, S.; LAVARONTI, O. J. Alterações químicas do solo após aplicação de biossólidos de estação de tratamento de efluentes de fábrica de papel reciclado. **Floresta**, v. 39, n. 1, p. 1-10, 2009.

DEMEYER, A.; VOUNDI, NKANA, J. C.; VERLOO, M. G. Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. **Bioresource Technology**, v. 77, n. 3, p. 287-295, 2001. DOI: 10.1016/S0960-8524(00)00043-2.

DIBDIAKOVA, J.; WANG, L.; HAILONG, L. Characterization of ashes from *Pinus Sylvestris* forest Biomass. **Energy Procedia**, v. 75, p. 186-191, 2015.

FERREIRO-DOMÍNGUEZ, N.; RIGUEIRO-RODRÍGUEZ, N. A.; BIANCHETTO, E.; MOSQUERA-LOSADA, M. R. Effect of lime and sewage sludge fertilisation on tree and understory interaction in a silvopastoral system. **Agriculture Ecosystems and Environment**, v. 188, p. 72-79, 2014. DOI: 10.1016/j.agee.2014.02.007.

MANDRE, M.; PÄRN, H.; OTS, K. Short-term effects of wood ash on the soil and the lignin concentration and growth of *Pinus Sylvestris* L. **Forest Ecology and Management**, v. 223, n. 1-3, p. 349-357, 2006. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.11.017.

MARTINS, F. M.; MARTINS, J. M.; FERRACIN, L. C.; CUNHA, C. J. Mineral phases of green liquor dregs, slaker grits, lime mud and wood ash of a kraft pulp and paper mill. **Journal of Hazardous Materials**, v. 147, n. 1-2, p. 610-617, 2007. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.057.

NOLASCO, A. M.; GUERRINI, I. A.; BENEDETTI, V. Uso de resíduos urbanos e industriais como fonte de nutrientes e condicionadores de solos florestais: aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2005. p. 386-414.

PARN, H. Effect of wood ash application on radial and height growth of young Scots pines (*Pinus sylvestris* L.). **Forestry Studies**, v. 42, p. 48-57, 2005.

REISSMANN, C. B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 135-166.

RODRIGUES, C. M.; BELOTTE, A. F. J.; DEDECK, R. A.; GOMES, F. S. Alterações na nutrição e na produtividade do *Pinus taeda* L. provocadas pela aplicação de resíduo celulósico. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 51, p. 131-143, 2005.

RODRIGUES, C. M. **Efeito da aplicação de resíduo da indústria de papel e celulose nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, na nutrição e biomassa do *Pinus taeda* L.** 2004. 109 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SAYER, M. A.; GOELZ, J. C. G.; CHAMBERS, J. L.; TANG, Z.; DEAN, T. J.; HAYWOOD, J. D.; LEDUC, D. J. Long-term trends in loblolly pine productivity and stand characteristics in response to thinning and fertilization in the West Gulf region. **Forest Ecology and Management**, v. 192, n. 1, p. 71-96, 2004. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.01.006.

SIKSTROM, U.; ALMQVIST, C.; JANSSON, G. Growth of *Pinus sylvestris* after the application of wood ash or P and K fertilizer to a peatland in southern Sweden. **Silva Fennica**, v. 44, n. 3, p. 411-425, 2010.

SILVA, F. C. da (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia; Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 1999. 370 p.

VARNAGIRYTE-KABAŠINSKIENE, I.; STAKENAS, V.; MIKŠYS, V.; KABAŠINSKAS, A. Vertical position of dry mass and elemental concentrations in *Pinus sylvestris* L. canopy under the different ash-nitrogen treatments. **iForest**, v. 8, p. 838-845, 2015.

